

**Zygmunt Szymański**  
Politechnika Śląska, Gliwice

## **NOWOCZESNE METODY BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH KOPALNIANYCH MASZYN PRZEPLYWOWYCH**

### **MODERN DIAGNOSTIC METHOD OF DRIVE SYSTEMS IN MINING FLOW MACHINE**

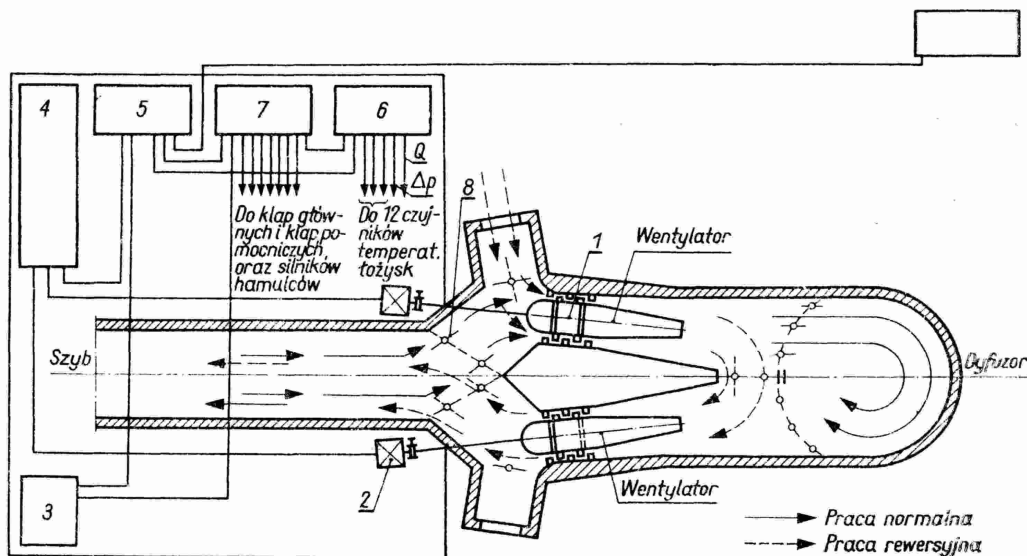
**Abstract:** The paper presents a selected method of diagnostic investigation implemented in mining fan drive system, with particular consideration of diagnostic: supply system, control system and driving parts of mining fan. In the paper, an exemplary automation control system of mining fan station using industrial controllers is presented. Some results of industrial measurements and selected visualizations screen presented in the paper assured on line control of exploitation parameters of fan station and failure states. Control algorithms proposed by authors were verified in industrial conditions.

#### **1. Wstęp**

Jednym z elementów restrukturyzacji polskiego przemysłu wydobywczego jest łączenie kopalń lub ich likwidacja. Wiąże się to ze zmianami struktury sieci wentylacyjnej, zmianami parametrów przewietrzania (wydajność i spiętrzenie) oraz pojawianiem się zależnych "prądów" powietrznych, które komplikują sterowanie sieciami wentylacyjnymi w podziemiach kopalń. Parametry przewietrzania można zmieniać przez: zmianę prędkości obrotowej wentylatora, zmianę ustawienia aparatu kierowniczego oraz dławienie na zasuwach w kanałach wentylacyjnych. W napędach wentylatorów głównego przewietrzania stosowane są silniki synchroniczne oraz silniki indukcyjne [4]. Wymaga się od nich 100% niezawodności w każdych warunkach eksploatacyjnych. Dlatego, w stacjach wentylatorowych stosowane są przeważnie napędy rezerwowe, gwarantujące ciągłość procesu przewietrzania kopalni (szczególnie w kopalniach metanowych) [2, 3]. W artykule przedstawiono modele badań diagnostycznych oraz algorytmy sterowania automatycznego kopalnianych wentylatorów głównego przewietrzania instalowanych na szybach wydechowych, oparte na sterownikach mikroprocesorowych. W artykule zamieszczono wyniki badań przemysłowych oraz przykładowe ekrany wizualizacyjne, zapewniające bieżącą kontrolę parametrów stacji oraz sygnalizację stanów awaryjnych. Proponowane algorytmy sterowania zostały zweryfikowane w warunkach przemysłowych.

#### **2. Kopalniane stacje wentylatorowe**

Stacje wentylatorowe muszą zapewniać ciągłe przewietrzanie kopalni, pomimo zatrzymania wydobycia lub wystąpienia stanów awaryjnych. Dlatego każda stacja wentylatorowa musi być wyposażona w dwa niezależne wentylatory, z których jeden jest czynny, a drugi rezerwowy [2, 3]. Układy sterowania stacjami wentylatorowymi muszą zapewniać bezzwłoczne przełączanie urządzeń rezerwowych w sposób ręczny lub automatyczny. Uproszczony schemat stacji wentylatorowej przedstawiono na rys.1. Każda stacja wentylatorowa jest wyposażona w aparaturę kontrolno-pomiarową, która przez zespół czujników i przetworników pomiarowych umożliwia przeprowadzanie on-line pomiarów eksploatacyjnych, ich rejestrację oraz transmisję sygnałów do jednostki centralnej. W stacji wentylatorowej przeprowadza się pomiary m.in.: wydajności, depresji lub kompresji, temperatury powietrza w dyfuzorze, temperatury łożysk wentylatora, ciśnienia oleju w obiegu smarowniczym, napięcia zasilania, prądów wzbudzenia [2, 3, 4]. W zależności od wskazań urządzeń kontrolno-pomiarowych przeprowadza się regulację odpowiednich parametrów wentylatora oraz diagnozuje ewentualne stany awaryjne. Stacja wentylatorowa umożliwia także przeprowadzanie rewersji przepływu powietrza w kanale wentylacyjnym. Stacja może także pracować w układzie automatycznym. Wszystkie informacje o pracy wentylatora oraz sygnalizacja stanu pracy awaryjnej powinny być przekazywane do dyspozytora kopalni.

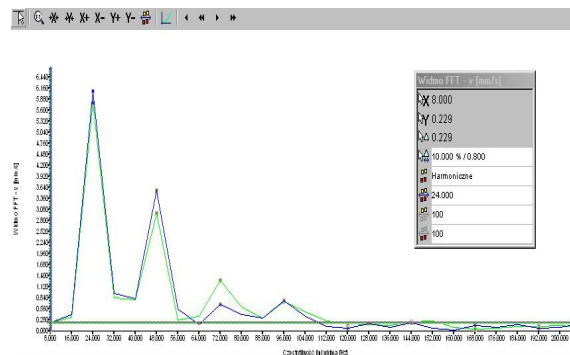


Rys. 1. Schemat stacji wentylatorów głównego przewietrzania kopalni

### 3. Metodyka badań diagnostycznych wentylatorów kopalnianych

Niezawodność pracy górniczych maszyn przepływowych zależy w znacznym stopniu od prawidłowej oceny stanu technicznego obwodów: elektrycznych, elektromechanicznych oraz mechanicznych. Ocenę można zrealizować w sposób globalny lub w ograniczonym zakresie - wykorzystując elementy diagnostyczne zainstalowane w maszynie. Diagnostykę globalną powinno się przeprowadzać w sposób okresowy [1, 2, 4,]. Ocena lokalna powinna być realizowana przed każdym uruchomieniem maszyny. W ramach diagnostyki lokalnej sprawdza się stan techniczny: silnika napędowego, układu zasilania, obwodów sterowania i zabezpieczeń, parametry i stan techniczny elementów wirujących: turbina, kierownice, aparat sterujący. Dla uzyskania możliwie pełnej automatyki badań diagnostycznych maszyny przepływowej muszą być wprowadzone odpowiednie zmiany w wyposażeniu i w budowie zespołu napędowego: wydzielenie obwodów pomiarowych z obwodów zasilania, wydzielenie obwodów sterowniczych oraz obwodów zabezpieczeń; wyprowadzenie obwodów kontrolno-pomiarowych do złącza diagnostycznego. Wszystkie wyniki pomiarów są archiwizowane w pamięci komputera nadrzędnego. Oryginalny program komputerowy **Diagwent** (opracowany przez Autora) oraz odpowiednie czujniki i przetworniki pomiarowe, umożliwiając realizację pomiarów

w sposób automatyczny. Wyniki obliczeń uzyskane na podstawie modeli matematycznych i fizycznych systemu wentylacyjnego mogą być prezentowane w sposób tabelaryczny i graficzny na ekranie monitora oraz drukowane w postaci protokołu badań diagnostycznych.



Rys. 2. Widmo częstotliwościowe przyspieszenia dla silnika 2SGS-400S-12/4

Ocenę stanu technicznego silnika napędowego można przeprowadzić przy wykorzystaniu: wyników analizy harmonicznych prądu stojana przy zasilaniu trójfazowym i dwufazowym [4, 5], analizę sygnału napięciowego indukowanego w żłobkach stojana [4], lub stosując metody wibromechaniczne albo akustyczne [5]. Metody te gwarantują dokładną diagnostykę silnika, ale ich zastosowanie wymaga jednak złożonych układów pomiarowych, dlatego stosowane są przede wszystkim przy diagnostyce globalnej [4, 5]. Przy bieżącej kontroli stanu technicznego

silnika napędowego można ograniczyć zakres pomiarów do: pomiarów, rezystancji uzwojeń stojana, rezystancji izolacji uzwojenia stojana, wizualnej kontroli stanu technicznego klatki wirnika oraz łożysk silnika [3, 5]. Ocenę stanu technicznego układu zasilania przeprowadza się sprawdzając: stacje zasilające (stacje transformatorowe), elementy wykonawcze (zasilacze przekształtnikowe: falownik lub układ soft-startu), zabezpieczenia zwarciove oraz realizując programy testujące umieszczone w pamięci sterownika przemysłowego (nastawy zabezpieczeń przeciążeniowych, zwarciowych, kontrola ciągłości napięć zasilających oraz obwodów sprzężeń zwrotnych). Ocenę stanu technicznego zasilaczy przekształtnikowych ( tranzystorowy lub tyrystorowy falownik napięcia) przeprowadza się sprawdzając: elementy wykonawcze, zabezpieczenia zwarciove oraz realizując programy testujące umieszczone w pamięci sterownika lokalnego zasilacza przekształtnikowego (nastawy zabezpieczeń przeciążeniowych, zwarciowych, kontrola ciągłości napięć zasilających oraz obwodów sprzężeń zwrotnych). Do diagnostyki układu mechanicznego i kinematycznego górniczych wentylatorów wykorzystuje się sygnały z czujników umieszczonych w elementach wirujących. Są to m.in.: czujniki temperatury, ruchu oraz kontroli stanu technicznego przekładni mechanicznej. Sygnały z czujników są przesyłane magistralą komunikacyjną do komputera nadrzędnego, gdzie są wykorzystywane zarówno do optymalnego sterowania pracą wentylatora, jak i do celów diagnostycznych. Jedną z przyczyn awarii wentylatora może być uszkodzenie wężła łożyskowego. Uszkodzeniu wężła łożyskowego towarzyszy: wzrost drgań, głośna praca łożyska, szum, wzrost temperatury uzwojeń i obudowy. Do diagnostyki wężła łożyskowego wykorzystuje się m.in. metody: SPM (Shock Pulse Method), SE (Spike Energy), SEE (Spectral Emitted Energy), metoda analizy częstotliwościowej, analizy akustycznej oraz metodę detekcji obwiedni [3]. Metoda detekcji obwiedni polega na analizie drgań rezonansowych maszyny. Krótkotrwałe udary widoczne w przebiegach czasowych mierzonego sygnału maszyny mogą być spowodowane uszkodzeniem wężła łożyskowego. Znając geometrię łożyska, ilość elementów tocznych oraz prędkość obrotową bieżni można obliczyć częstotliwości rezonansowe układu. Czujnik drgań jest umieszczany na badanym elemencie. Sygnał pomiarowy po

filtracji w filtrach pasmowo przepustowych i dopasowaniu jest analizowany w pobliżu obliczonych częstotliwości rezonansowych. Na rys.2 przedstawiono widmo częstotliwościowe przyspieszenia dla silnika 2SGS-400S-12/4.

#### 4. Model dynamiczny wentylatora kopalnianego

Wentylatory głównego przewietrzania kopalni są napędzane silnikami: indukcyjnymi (klatkowymi lub pierścieniowymi), lub synchronicznymi. W stacjach wentylatorowych z regulacją wydajności przez zmianę prędkości obrotowej, stosowane są głównie silniki indukcyjne pierścieniowe w układzie kaskady podsynchronicznej [4], lub silniki klatkowe zasilane z pośrednich przemienników częstotliwości [5]. Analiza stanów dynamicznych stacji wentylatorowych powinna zawierać aerologiczne stany dynamiczne zachodzące w sieci wentylacyjnej kopalni oraz elektromagnetyczne i elektromechaniczne stany dynamiczne zachodzące w układzie napędowym: wentylator – silnik napędowy. W artykule ograniczono się do analizy stanów dynamicznych układu napędowego wentylatora zakładając stan quasi-ustalony w sieci wentylacyjnej [3, 4]. Przepływ powietrza w sieci wentylacyjnej, wymuszony przez wentylator promieniowy opisuje równanie Bernoulliego [1, 2, 3, 4]. Dla wentylatorów kopalnianych operuje się pojęciem depresji (kompresji): całkowitej  $\Delta p_c$  i statycznej  $\Delta p_{st}$ . Wielkości te zależą od parametrów: lutni, dyfuzora ( $R_w$  - promień lutni,  $S_{zast}$  powierzchnia zastępcza) oraz od prędkości wirowania turbiny wentylatora  $\omega_w$ . Zależność depresji całkowitej od parametrów konstrukcyjnych wentylatora opisuje w sposób uproszczony wyrażenie (1):

$$\Delta p_c = \Delta p_{st} + \frac{\chi_p \omega_w^2 R_w}{2g} \quad (1)$$

Wydajność wentylatora można określić z relacji (2):

$$Q_w = S_{zast} \omega_w R_w \quad (2)$$

Wypadkowy moment obciążenia spowodowany na wał silnika napędzającego wentylator przez przekładnię o przełożeniu  $i_p$  można wyrazić wzorem (3):

$$M_w = S_{zast} i_p \eta_p \left( \frac{\Delta p_{st} R_w}{\eta_w} + \frac{\chi_p R_w^3 \omega_w^2}{2 \eta_w g i_p^2} \right) \quad (3)$$

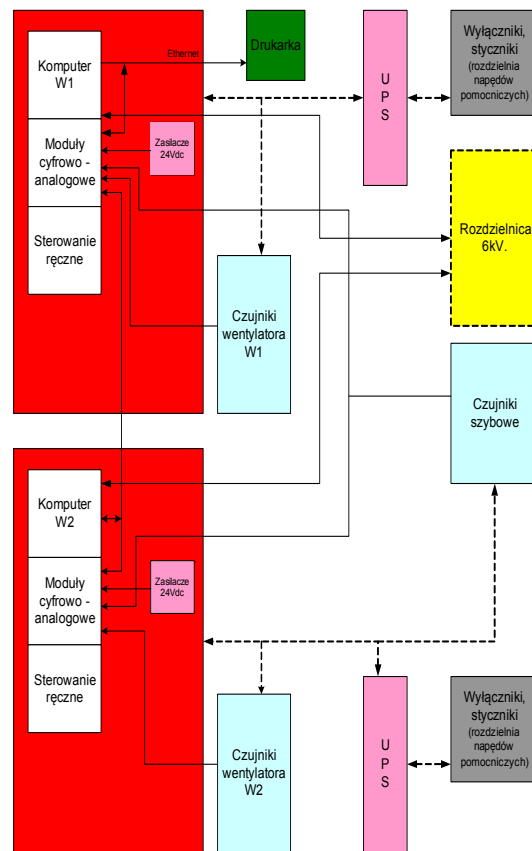
Równania (1 - 3) umożliwiają zbudowanie modelu symulacyjnego wentylatora kopalnianego

napędzanego silnikiem synchronicznym. Do budowy schematu blokowego wykorzystano procedury programu Matlab - Simulink 6,5 [4]. Przy analizie kopalnianej sieci wentylacyjnej można zastosować metody obliczeń: naturalnego rozplywu powietrza, wymuszonego rozplywu powietrza oraz metody obliczeń wymuszonego rozplywu z zależnymi prądami powietrza [1, 2, 3, 4]. Modele matematyczne kopalnianych sieci wentylacyjnych wymagają znajomości parametrów rozkładu przestrzennego wyrobisk kopalnianych, układu tam wentylacyjnych oraz szczegółowych informacji o zapotrzebowaniu powietrza o odpowiednich parametrach w określonych odcinkach wyrobisk kopalnianych (przodki wydobywcze, przodki robót przygotowawczych, i inne) [3, 4]. Algorytmy obliczeń symulacyjnych modeli sieci wentylacyjnych umożliwiają obliczenie rozplywu powietrza w dowolnych punktach sieci, oraz określenie parametrów zapotrzebowanych przez system wentylacyjny układu wentylatorów głównego przewietrzania. Schemat blokowy układu sterowania wentylatora głównego przewietrzania przedstawiono na rys.3. Układ sterowania umożliwia zmianę parametrów zasilania silnika napędowego: napięcie zasilania stojana, częstotliwość zasilania oraz parametrów wentylatora: przekrój powierzchni otworu na wlocie oraz dyfuzora. Analizę procesów symulacyjnych przeprowadzono dla dwóch wariantów systemu wentylacyjnego: przy pominięciu dynamiki sieci wentylacyjnej, wprowadzając tylko wypadkową charakterystykę obciążenia wentylatora oraz przy przybliżonym uwzględnieniu struktury sieci wentylacyjnej [3, 4]. Założenia upraszczające systemu wentylacyjnego mogą wypaczać uzyskane wyniki symulacji komputerowych. Wyniki obliczeń są korygowane przez odpowiednie funkcje dopasowujące, określane w sposób indywidualny, na podstawie pomiarów kontrolnych na rzeczywistych obiektach. Analizę przeprowadzono dla układu wentylacyjnego stacji złożonego z silnika synchronicznego napędzającego wentylator promieniowy WPK z regulacją wydajności przy pomocy: układu zasuw oraz aparatu kierowniczego.

### 5. Nowoczesny układ sterowania automatycznego wentylatora kopalnianego

W każdej stacji wentylatorowej zastosowano: sterownik główny, moduły wejść/wyjść, czujniki pomiarowe umieszczone w wentylatorze

oraz w szybie, zasilacze 24V DC, źródła napięć gwarantowanych UPS, wyłączniki i styczniki dla napędów pomocniczych, rozdzielnicę 6kV. W przypadku stacji dla Szybu III będzie to układ dwóch szaf sterowniczych SW1 i SW2 wraz z osprzętem towarzyszącym, dla Szybu IV będą to odpowiednio szafy SW3, SW4 i SW5 – również z osprzętem towarzyszącym. Pomędzy szafami sterowniczymi zrealizowano sieć transmisyjną Ethernet. Bazując na sieci Ethernet można przysyłać sygnały do Dyspozytorni Głównej kopalni.



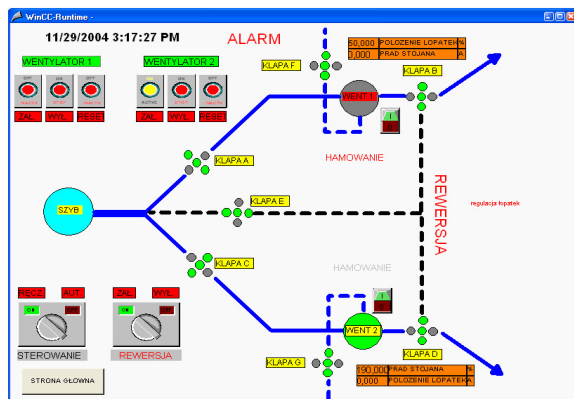
Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania wentylatorów dla Szybu III

Poszczególne sterowniki są połączone do sieci Ethernet. Sygnały przesyłane do sterowników PLC można podzielić na dwie grupy: sygnały analogowe – sygnały z przekładników prądowych, sygnały z rezystancyjnych czujników poziomu, temperatury, przepływu oraz sygnały cyfrowe – (rozdzielone na wejściowe i wyjściowe) do kontroli dwustanowej położenia klap bądź zasuw, do sterowania stycznikami napędów. Każda szafa jest zasilana z własnego źródła napięcia niewyłączalnego. Czujniki szybowe zasilane mogą być z oddzielnej RNG,





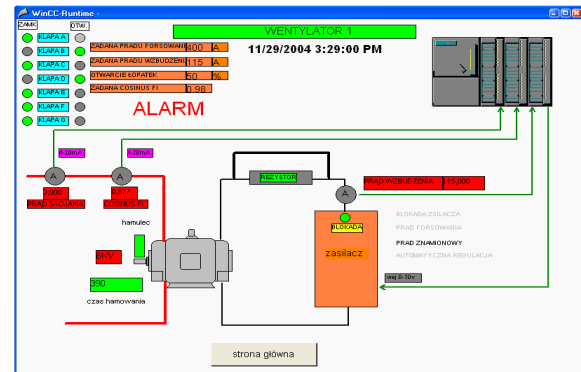
momowane przez producenta, tabele deklaracji zmiennych oraz poszczególne podprogramy. System nadzoru pracy wentylatorów głównego przewietrzania zaprojektowano w taki sposób, aby operator posiadał pełny zestaw informacji o stanie rzeczywistym wszystkich urządzeń stacji wentylatorowej. Jako terminal graficzny zastosowano monitor z komputerem PC podłączonym przez sieć przemysłową Ethernet ze sterownikiem PLC. Zastosowanie sieci przemysłowej pozwala na zamontowanie panelu operatorskiego w oddalonej od stacji wentylatorów dyspozytorni. Do wizualizacji wykorzystano program WIN CC v 6.0 [4], który umożliwia sterowanie, nadzór oraz monitorowanie cyklu pracy urządzeń stacji głównego przewietrzania. Wizualizacja polega na prezentacji przebiegu i stanu procesu za pomocą struktury plansz przedstawiających różne obszary technologiczne jako grafika bitmapowa.



Rys. 6. Schemat wizualizacyjny panelu sterowania stacji wentylatorowej

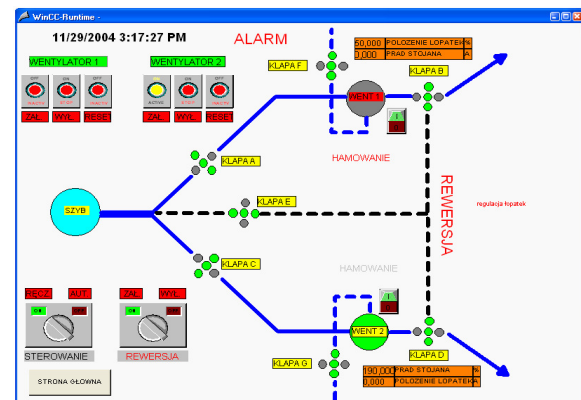
Pojedyncza plansza to ekran z naniesionymi obiektami animowanymi na podstawie wartości mierzonej lub zdefiniowanej w algorytmie sterowania. Każda plansza przedstawiona na ekranie modułu graficznego uzupełniona jest o stałe pola, na których wyświetlany jest czas, data, nazwa planszy oraz komunikat słowny o zaistniałej awarii. Do wizualizacji prezentowanego na terminalu stanu pracy stacji głównego przewietrzania zaprojektowano zestaw plansz. Przykład wizualizacji pracy stacji wentylatorowej przedstawiono na rys.6. Na rys. 7 i 8 przedstawiono przykładowo wyniki rejestracji w czasie rzeczywistym wybranych parametrów wentylatora oraz ekrany wizualizacyjne umożliwiające sterowanie lokalne oraz półautomatyczne pracą stacji wentylatorowej z równoczesną sygnalizacją stanów awaryjnych oraz przeciżeniowych. Na rys.9 przedstawiono wyniki

rejestracji wybranych parametrów wentylatora przy skokowej zmianie prądu wzbudzenia silnika synchronicznego. Proponowane rozwiązanie układu sterowania kopalnianych stacji wentylatorowych jest rozwiązaniem oryginalnym, częściowo sprawdzonym w warunkach przemysłowych, ale wymaga dalszych prac badawczych.



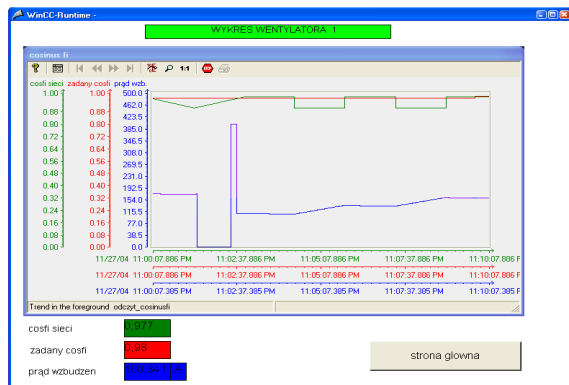
Rys. 7. Tablica synoptyczna wentylatora 1 stacji wentylatorowej

Należy opracować uogólnione algorytmy sterowania pracą zespołu napędowego oraz układem sterowania parametrami wentylacyjnych stacji wentylatorowej z uwzględnieniem specyfiki indywidualnych sieci wentylacyjnych.



Rys. 8. Wizualizacja stacji wentylatorowej w KWK

Zagadnienia te będą rozwiązywane przy ścisłej współpracy ze specjalistami z dziedziny wentylacji kopalnianej. Nowoczesny, inteligentny układ sterowania i diagnostyki pracą stacji wentylatorowej opracowany przez Autora, został sprawdzony w warunkach przemysłowych. Układ ten po uzyskaniu dopuszczenia może być w ograniczonym zakresie wykorzystany w kopalnianych stacjach wentylatorowych przynosząc korzyści eksploatacyjne i diagnostyczne.



Rys. 9. Rejestracja wybranych parametrów wentylatora

## 7. Zakończenie

Postęp w dziedzinie elektroniki, informatyki oraz telekomunikacji umożliwia wprowadzenie do układów: sterowania, diagnostyki i monitorowania pracy górniczych maszyn przepływowych sterowników mikroprocesorowych oraz cyfrowej transmisji sygnałów. Do sterowania systemami wentylacyjnymi w sposób ciągły i niezawodny niezbędne są nowoczesne czujniki i przetworniki pomiarowe, sterowniki mikroprocesorowe do przetwarzania wielkości pomiarowych. Dla zwiększenia niezawodności oraz trwałości pracy wentylatorów głównego przewietrzania muszą być przeprowadzane pomiary diagnostyczne, które zapewniają właściwą kontrolę poszczególnych zespołów stacji wentylatorowej oraz zapobiegają w znacznym

stopniu awariom. Zastosowanie sterowników PLC lub komputerów przemysłowych w układach sterowania maszyn górniczych, zapewni lepszą kontrolę pracy tych maszyn z możliwością sterowania półautomatycznego lub nawet automatycznego.

## 8. Literatura

- [1]. Frycz A., Sułkowski J., Kolarczyk M.: *Sposoby wymuszania i regulacji rozplywu powietrza w głębokich kopalniach rud miedzi*. CUPRUM, nr 1-2, 1987.
- [2]. Kolarczyk M., Oleksy M., Pach G.: *Tworzenie cyfrowego modelu struktury sieci dualnej dla sieci płaskiej zredukowanej*. Konferencja Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju, Gliwice, 2004r.
- [3]. Sułkowski J., Szczurek A.: *Energooszczędna wentylacja główna kopalni podziemnej*. Przegląd Górniczy, nr 1, 2001.
- [4]. Szymański Z.: *Nowoczesne metody sterowania i automatyzacji pracy kopalnianych stacji wentylatorowych*. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa Katowice, nr 12, 2004 r.
- [5]. Szymański Z.: *Diagnostyka i monitoring górniczych maszyn przepływowych*. Materiały Międzynarodowej Konferencji TEMAG'05. Ustroń, listopad, 2005 r.

## Autor

dr inż. Zygmunt Szymański, Politechnika Śląska Gliwice ++4832 2371688

email.: Zygmunt.Szymanski@polsl.pl